

УДК 621.383.92

PACS: 85.60.-q

Исследование характеристик матричных лавинных фотоприемников в режиме счета фотонов

И. Р. Гулаков, А. О. Зеневич, Е. В. Новиков, О. В. Кочергина, А. А. Лагутик

Матричные многоэлементные лавинные фотоприемники, работающие в режиме счета фотонов, находят широкое применение для регистрации оптического излучения. Однако характеристики матричных многоэлементных лавинных фотоприемников в таком режиме работы в настоящее время недостаточно изучены. Объектами исследований являлись опытные образцы Si-ФЭУ с p^+p-n^+ -структурой производства ОАО «Интеграл» (Республика Беларусь), серийно выпускаемые Si-ФЭУ Кетек РМ 3325 и ON Semi FC 30035. В данной статье приведены результаты исследования характеристик в режиме счета фотонов указанных фотоприемников. Определены зависимости удельного коэффициента амплитудной чувствительности от длины волны оптического излучения, температуры и напряжения питания матричного многоэлементного лавинного фотоприемника.

Ключевые слова: матричный лавинный фотоприемник, счет фотонов, коэффициент амплитудной чувствительности.

DOI: 10.51368/2307-4469-2021-9-3-216-223

Введение

В настоящее время в различных областях науки и техники находят применение матричные многоэлементные лавинные фотоприемники, такие как кремниевые фотоэлектронные умножители (Si-ФЭУ). Они используются в ядерной физике, оп-

тике и спектроскопии, а также в позитронно-эмиссионной томографии для обнаружения радиоактивных и взрывчатых веществ при лазерном зондировании с помощью ЛИДАР-технологий.

Наиболее часто для регистрации оптического излучения при помощи Si-ФЭУ применяют режим счета фотонов [1–4]. Однако характеристики Si-ФЭУ в этом режиме работы недостаточно изучены. При одновременной регистрации m фотонов различными элементами в амплитудном распределении электрических импульсов на выходе Si-ФЭУ регистрируется импульс с амплитудой mA_0 , где A_0 – средняя амплитуда импульсов, формирующихся при срабатывании только одного элемента Si-ФЭУ. Чем больше амплитуда импульса, тем большее число фотонов зарегистрировано Si-ФЭУ одновременно.

Гулаков Иван Романович, профессор, д.ф.-м.н.
Зеневич Андрей Олегович, ректор, профессор, д.т.н.

Новиков Евгений Владимирович, доцент, к.т.н.
Кочергина Ольга Викторовна, аспирант.

E-mail: o.kochergina@bsac.by
Лагутик Анастасия Андреевна, аспирант.
Белорусская государственная академия связи.
Беларусь, 220114, г. Минск, ул. Ф. Скорины, 8/2.

Статья поступила в редакцию 26 марта 2021 г.

© Гулаков И. Р., Зеневич А. О., Новиков Е. В.,
Кочергина О. В., Лагутик А. А., 2021

Измерив амплитуду этого импульса, можно определить количество одновременно сработавших элементов. Для оценки среднего числа фотонов $\langle N_{\text{ф}} \rangle$, зарегистрированных за время измерения, определяют среднюю амплитуду электрических импульсов $A_{\text{ср}}$ в амплитудном распределении импульсов Si-ФЭУ и предложенный в работе [5] коэффициент амплитудной чувствительности $\beta = (A_0 \eta)^{-1}$, где η – квантовая эффективность регистрации фотоприемника.

Следует отметить, что коэффициент амплитудной чувствительности применим для фотоприемников, работающих в режиме счета фотонов, в амплитудном распределении выходных импульсов которых имеются не только импульсы с амплитудами A_0 , но и инициированные одновременной регистрацией нескольких фотонов.

Целью данной работы является определение зависимости удельного коэффициента амплитудной чувствительности от

длины волны оптического излучения, температуры и напряжения питания Si-ФЭУ.

Экспериментальная установка и методика исследования

Объектами исследований являлись опытные образцы Si-ФЭУ с $p^+ - p - n^+$ -структурой производства ОАО «Интеграл» (Республика Беларусь), серийно выпускаемые Si-ФЭУ *Кетек РМ 3325* и *ON Semi FC 30035*. На рис. 1 представлена структурная схема экспериментальной установки, на которой были проведены исследования.

В экспериментальной установке в качестве источника оптического излучения используется набор светодиодов С со следующими длинами волн: 380, 470, 560, 580, 650, 850 и 940 нм. Данные длины волн оптического излучения полностью перекрывают диапазон спектральной чувствительности исследуемых Si-ФЭУ [4].

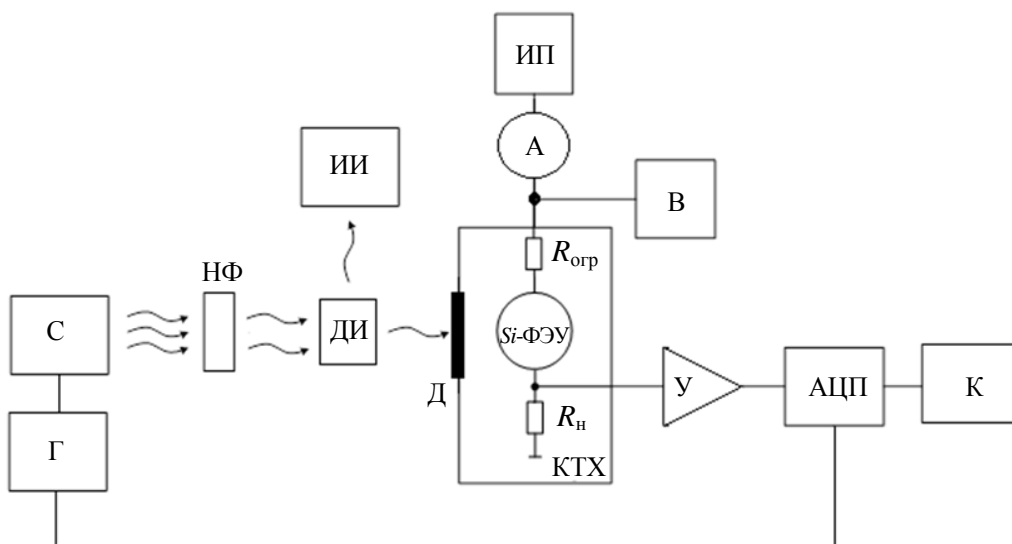


Рис. 1. Структурная схема экспериментальной установки: ИП – источник постоянного напряжения; С – светодиод; НФ – набор нейтральных светофильтров; Д – диафрагма; А – амперметр; В – вольтметр; $R_{\text{н}}$ – резистор нагрузки; $R_{\text{огр}}$ – ограничивающий резистор; КТХ – камера тепла и холода; ИИ – устройство измерения энергетической экспозиции оптического излучения; ДИ – делитель оптического излучения, У – усилитель, АЦП – аналого-цифровой преобразователь; К – компьютер, Г – генератор прямоугольных электрических импульсов.

Для формирования оптических импульсов на светодиоды подавались электрические импульсы, от генератора прямоугольных импульсов Г. Длительность электрических импульсов генератора Г составляла 1 мкс, а частота их следования 10^4 Гц. Длительность электрических импульсов генератора Г соответствовала минимально возможной длительности электрического импульса, создаваемого *Si-ФЭУ* на резисторе R_n . При такой частоте следования импульсов удается избежать влияния релаксационных явлений, возникающих в *Si-ФЭУ* после окончания регистрации одного оптического импульса, на процесс регистрации следующего за ним оптического импульса. Оптические импульсы, создаваемые светодиодом, поступали на набор нейтральных светофильтров НФ. При помощи набора нейтральных светофильтров осуществлялось ослабление интенсивности оптического излучения в диапазоне от 10^{-5} до 10^{-10} Вт/см². После прохождения нейтральных светофильтров оптические импульсы поступают на делитель оптического излучения ДИ, который используется для разделения одного импульса на два, причем с одинаковыми интенсивностями. Таким образом, один оптический импульс поступает на вход измерителя энергетической экспозиции ИИ, а другой подается через диафрагму Д на *Si-ФЭУ* (см. рис. 1). Диафрагма использовалась для перекрывания поступления оптических импульсов на *Si-ФЭУ*. Отметим, что для исключения фоновой засветки *Si-ФЭУ* осуществлялась светоизоляция следующих элементов установки: набора светодиодов, набора нейтральных светофильтров, диафрагмы, делителя оптического излучения, измерителя интенсивности. *Si-ФЭУ* помещался в светонепроницаемую камеру тепла и холода КТХ.

Постоянное напряжение питания U_n подавалось на *Si-ФЭУ* от источника питания ИП. Напряжение U_n контролировалось при помощи вольтметра В. Электрический

ток, протекающий через *Si-ФЭУ*, измерялся амперметром А. Для ограничения электрического тока, протекающего через *Si-ФЭУ*, использовался резистор $R_{огр}$ (см. рис. 1). Последовательно с *Si-ФЭУ* подсоединялся нагрузочный резистор R_n . В случае закрытой диафрагмы амперметр А регистрировал темновой ток I_t , протекающий через *Si-ФЭУ* в отсутствие оптических импульсов. При открытой диафрагме амперметр А измерял общий ток I , т. е. состоящий из темнового тока и фототока I_f .

Камера тепла и холода использовалась для изменения рабочей температуры *Si-ФЭУ*. Рабочая температура *Si-ФЭУ* изменялась в диапазоне от 243 до 313 К. Такой температурный диапазон был выбран специально, поскольку при этих температурах наиболее часто эксплуатируются приборы, созданные на основе *Si-ФЭУ*.

Когда диафрагма Д была открыта и на *Si-ФЭУ* подавались оптические импульсы, то на его резисторе нагрузки R_n формировались импульсы напряжения. После чего эти импульсы усиливались при помощи усилителя У и поступали на аналого-цифровой преобразователь (АЦП).

Запуск АЦП осуществлялся генератором Г, что обеспечивало синхронизацию работы АЦП с поступлением оптических импульсов на *Si-ФЭУ*. Такая синхронизация позволяет аналого-цифровому преобразователю выполнять оцифровку сигнальных импульсов напряжения только в то время, когда на *Si-ФЭУ* поступали оптические импульсы. Это практически исключало регистрацию темнового сигнала, формируемого *Si-ФЭУ* на резисторе нагрузки в отсутствие оптического излучения.

Данные с выхода АЦП поступали в компьютер К. Обработка данных осуществлялась при помощи специализированного программного обеспечения. Программное обеспечение позволяло подсчитывать количество импульсов, поступивших за некоторый промежуток времени, определять

амплитуду импульса, формирующегося при срабатывании только одного элемента *Si-ФЭУ*, среднюю амплитуду импульсов и их среднее квадратическое отклонение.

Поскольку исследуемые *Si-ФЭУ* имели различные напряжения пробоя $U_{пр}$, то для сравнения их характеристик между собой использовалась величина перенапряжения, определяемая следующим образом: $\Delta U = U_{п} - U_{пр}$. Исследования проводились в диапазоне перенапряжений $\Delta U = -0,5 \div 1,0$ В. Этот диапазон был обусловлен тем, что при меньших значениях перенапряжения реализовать режим счета фотонов на исследуемых *Si-ФЭУ* не удавалось. Для больших значений перенапряжений наблюдалось значительное увеличение темнового тока, что могло привести к тепловому пробоя *Si-ФЭУ*.

Напряжение пробоя $U_{пр}$ определялось по вольт-амперной характеристики *Si-ФЭУ* при закрытой диафрагме D по методике, описанной в работе [4]. Отметим, что величина напряжения пробоя увеличивалась с ростом температуры окружающей среды. При определении величины перенапряжения учитывались изменения напряжения пробоя в зависимости от температуры окружающей среды *Si-ФЭУ*.

Среднее число фотонов $\langle N_{\phi} \rangle$ за время длительности импульса в режиме счета фотонов можно определить по средней амплитуде электрических импульсов $A_{ср}$ в амплитудном распределении импульсов на выходе *Si-ФЭУ* [5]:

$$\langle N_{\phi} \rangle = \beta A_{ср}. \quad (1)$$

Так как исследуемые фотоприемники имели разную площадь фоточувствительной поверхности S , то для сравнения их между собой лучше использовать величину удельного коэффициента амплитудной чувствительности, который определялся выражением:

$$\beta_s = \frac{1}{\eta A_0 S}. \quad (2)$$

Удельный коэффициент амплитудной

чувствительности на основании (1) определяется по формуле:

$$\beta_s = \frac{\langle N_{\phi} \rangle}{A_{ср} S} = \frac{J \lambda t}{A_{ср} h c}, \quad (3)$$

где J – интенсивность регистрируемого оптического излучения; λ – длина волны; h – постоянная Планка; c – скорость света в вакууме; t – длительность оптического импульса.

Отношение сигнал/шум определялось выражением [5]:

$$C/\text{Ш} = \frac{A_{ср}}{\sqrt{D}}, \quad (4)$$

где D – дисперсия амплитудного распределения импульсов. Минимальное значение $A_{ср}$, которое можно зарегистрировать, равно \sqrt{D} , что соответствует отношению сигнал/шум равному единице. На основании этого и выражений (1) и (4) можно определить минимальное число фотонов N_{\min} , которое удастся зарегистрировать *Si-ФЭУ* в режиме счета фотонов, по следующей формуле:

$$N_{\min} = \beta \sqrt{D} = \beta_s S \sqrt{D}. \quad (5)$$

Результаты измерения и их обсуждение

Выполненная оценка по вольт-амперным характеристикам напряжений пробоя исследуемых кремниевых фотоприемников показала, что они имеют при температуре 293 К следующие значения: $U_{пр} = 27,0$ В для *Ketek PM 3325*; $U_{пр} = 24,7$ В для *ON Semi FC 30035*; $U_{пр} = 37,5$ В для *Si-ФЭУ* производства ОАО «Интеграл» соответственно. В исследуемом диапазоне температур зависимость напряжения пробоя от температуры была линейной. При этом коэффициент линейной зависимости принимает следующие значения: $\Delta U_{пр} / \Delta T = 0,010$ В/К

для *Кетек РМ 3325*, $\Delta U_{\text{пр}}/\Delta T = 0,014$ В/К для *ON Semi FC 30035*, $\Delta U_{\text{пр}}/\Delta T = 0,017$ В/К для *Si-ФЭУ* производства ОАО «Интеграл» ($\Delta U_{\text{пр}}$ – изменение напряжения пробоя, ΔT – изменение температуры).

На рис. 2 представлена зависимость удельного коэффициента амплитудной чувствительности от длины волны оптического излучения. Зависимости получены для перенапряжения $\Delta U = 0,3$ В и температуры $T = 293$ К.

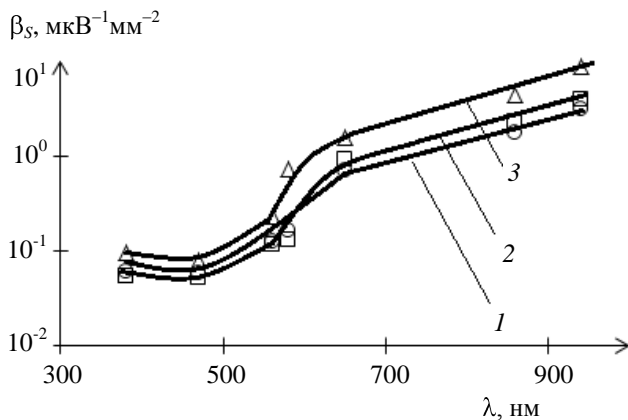


Рис. 2. Зависимость удельного коэффициента амплитудной чувствительности от длины волны: 1 – *Кетек РМ 3325*; 2 – *ON Semi FC 30035*; 3 – *Si-ФЭУ* производства ОАО «Интеграл».

Все зависимости удельного коэффициента амплитудной чувствительности от длины волны имеют минимум, соответствующий длине волны оптического излучения 470 нм. Наименьшее значения β_s во всем исследуемом диапазоне длин волн имеют *Si-ФЭУ* марки *Кетек РМ 3325*, а наибольшие – *Si-ФЭУ* производства ОАО «Интеграл». Увеличение длины волны приводит к росту удельного коэффициента амплитудной чувствительности. Максимальное значение β_s соответствовало наибольшей длине волны в исследуемом интервале длин волн, а именно, 980 нм.

При этом средняя амплитуда импульсов, зарегистрированных при срабатывании только одного элемента *Si-ФЭУ*, не зависит от длины волны оптического излучения и принимала следующие значе-

ния: $A_0 = 12$ мВ для *Кетек РМ 3325*, $A_0 = 10$ мВ для *ON Semi FC 30035*, $A_0 = 5$ мВ для *Si-ФЭУ* производства ОАО «Интеграл».

При других значений ΔU и температуре $T = 293$ К в исследуемом диапазоне перенапряжений зависимости удельного коэффициента амплитудной чувствительности от длины волны имели аналогичный вид.

На рис. 3 представлены зависимости удельного коэффициента амплитудной чувствительности от перенапряжения. Данные зависимости получены для температуры $T = 293$ К и длине волны оптического излучения 470 нм. Отметим, что такие зависимости для других длин волн были аналогичными.

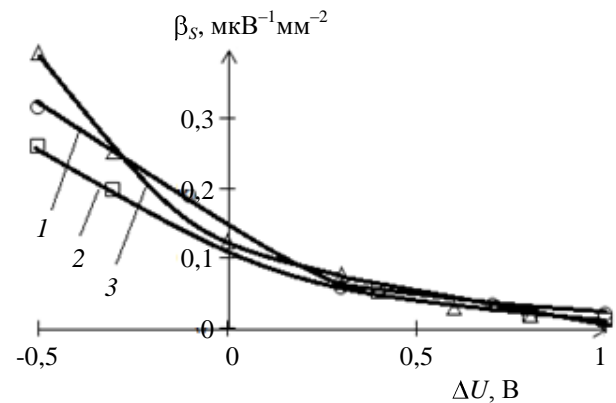


Рис. 3. Зависимость удельного коэффициента амплитудной чувствительности от перенапряжения: 1 – *Кетек РМ 3325*; 2 – *ON Semi FC 30035*; 3 – *Si-ФЭУ* производства ОАО «Интеграл».

Увеличение перенапряжения приводило к уменьшению удельного коэффициента амплитудной чувствительности для всех исследуемых температур и длин волн оптического излучения. Так, для зависимостей, показанных на рис. 3, при $\Delta U = -0,5$ В величина $\beta_s = 0,39; 0,26; 0,31$ мкВ⁻¹мм⁻² для *Si-ФЭУ* производства ОАО «Интеграл», *ON Semi FC 30035* и *Кетек РМ 3325* соответственно. При увеличении перенапряжения до $\Delta U = 1,0$ В значение удельного коэффициента амплитудной чувстви-

тельности уменьшалось более чем в 10 раз до $\beta_S \approx 0,02 \text{ мкВ}^{-1} \text{ мм}^{-2}$ для всех исследуемых *Si-ФЭУ*, так как с увеличением перенапряжения происходит рост квантовой эффективности регистрации и средней амплитуды импульсов A_0 .

Для оценки, в какой степени влияет изменение приложенного к *Si-ФЭУ* напряжения питания на величину удельного коэффициента амплитудной чувствительности, воспользуемся отношением изменения удельного коэффициента амплитудной чувствительности $\Delta\beta_S$ к соответствующему ему изменению напряжения питания $\Delta U_{\text{п}}$. Тогда в диапазоне перенапряжений от $-0,5$ до $0,3 \text{ В}$ величина $\Delta\beta_S / \Delta U_{\text{п}} = -0,32 \text{ мкВ}^{-2} \text{ мм}^{-2}$ для *Кетек РМ 3325*, $\Delta\beta_S / \Delta U_{\text{п}} = -0,26 \text{ мкВ}^{-2} \text{ мм}^{-2}$ для *ON Semi FC 30035* и $\Delta\beta_S / \Delta U_{\text{п}} = -0,39 \text{ мкВ}^{-2} \text{ мм}^{-2}$ для *Si-ФЭУ* производства ОАО «Интеграл». В диапазоне перенапряжений от $0,3$ до $1,0 \text{ В}$ величина $\Delta\beta_S / \Delta U_{\text{п}} = -0,06 \text{ мкВ}^{-2} \text{ мм}^{-2}$ для всех исследуемых *Si-ФЭУ*. Таким образом, наиболее сильная зависимость β_S от ΔU наблюдается для перенапряжений от $-0,5$ до $0,3 \text{ В}$. Поэтому для обеспечения постоянного значения β_S для интервала перенапряжений от $-0,5$ до $0,3 \text{ В}$ необходима более высокая стабилизация напряжения питания *Si-ФЭУ*, чем для интервала от $0,3$ до $1,0 \text{ В}$, причем *Si-ФЭУ* производства ОАО «Интеграл» требуют лучшей стабилизации напряжения питания, чем *Кетек РМ 3325* и *ON Semi FC 30035*.

На рис. 4 представлена зависимость удельного коэффициента амплитудной чувствительности от температуры. Эти зависимости получены для перенапряжения $\Delta U = 0,3 \text{ В}$ и длины волны оптического излучения 470 нм . Увеличение температуры приводит к росту удельного коэффициента амплитудной чувствительности. Это объясняется тем, что с увеличением температуры уменьшаются значения амплитуды импульса, формирующегося при срабатывании только одного элемента *Si-ФЭУ*, и квантовой эффективности регистрации.

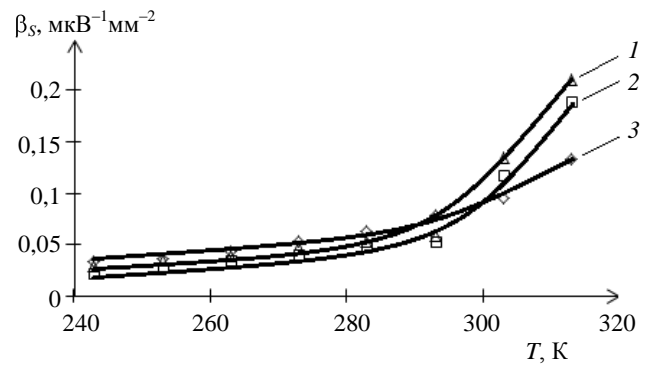


Рис. 4. Зависимость удельного коэффициента амплитудной чувствительности от температуры: 1 – *Кетек РМ 3325*; 2 – *ON Semi FC 30035*; 3 – *Si-ФЭУ* производства ОАО «Интеграл».

Для оценки, в какой степени влияет изменение температуры окружающей среды *Si-ФЭУ* на величину удельного коэффициента амплитудной чувствительности, воспользуемся отношением изменения удельного коэффициента амплитудной чувствительности $\Delta\beta_S$ к соответствующему ему изменению температуры ΔT .

В диапазоне температур $\Delta T = 243 \div 293 \text{ К}$ величина составляет $\Delta\beta_S / \Delta T = 0,90; 0,62; 0,59 \text{ мВ}^{-1} \text{ мм}^{-2} \text{ К}^{-1}$ для *Si-ФЭУ* производства ОАО «Интеграл», *ON Semi FC 30035*, *Кетек РМ 3325* соответственно. В диапазоне температур $\Delta T = 293 \div 313 \text{ К}$ $\Delta\beta_S / \Delta T = 2,75; 6,83; 7,59 \text{ мВ}^{-1} \text{ мм}^{-2} \text{ К}^{-1}$ для *Si-ФЭУ* производства ОАО «Интеграл», *ON Semi FC 30035*, *Кетек РМ 3325* соответственно. Таким образом, наиболее сильная зависимость β_S от T наблюдается для температур от 293 до 313 К , по сравнению с интервалом температур $243 \div 293 \text{ К}$. Поэтому для обеспечения постоянного значения β_S для интервала температур от 293 до 313 К необходима более высокая стабилизация температуры, чем для интервала от 243 до 293 К .

По формуле (5) определялось минимальное количество фотонов с длиной волны 470 нм , которое удастся зарегистрировать за 1 мкс при $T = 243 \text{ К}$: $\langle N_{\phi} \rangle = 1$ для *Si-ФЭУ* марки *Кетек РМ 3325*, $\langle N_{\phi} \rangle = 1$ для *Si-ФЭУ* марки *ON Semi FC 30035*, а для *Si-ФЭУ* производства ОАО «Интеграл» – $\langle N_{\phi} \rangle = 3$. При $T = 313 \text{ К}$ $\langle N_{\phi} \rangle = 17$

для Si-ФЭУ марки *Кетек РМ 3325*, $\langle N_{\phi} \rangle = 44$ для Si-ФЭУ марки *ON Semi FC 30035*, а для Si-ФЭУ производства ОАО «Интеграл» – $\langle N_{\phi} \rangle = 47$.

Заключение

Исследовано влияние длины волны оптического излучения, перенапряжения и температуры окружающей среды на удельный коэффициент амплитудной чувствительности опытных образцов кремниевых фотоумножителей производства ОАО «Интеграл» (Республика Беларусь) и серийно выпускаемых *Кетек РМ 3325* и *ON Semi FC 30035*.

Определено, что минимальное значение удельного коэффициента амплитудной чувствительности соответствует длине волны 470 нм; при отклонении длины волны оптического излучения от 470 нм значение удельного коэффициента амплитудной чувствительности увеличивается.

Установлено, что увеличение перенапряжения приводит к уменьшению удельного коэффициента амплитудной чувствительности для всех исследуемых температур и длин волны оптического излучения. Наибольшая зависимость удельного коэффициента амплитудной чувствительности от перенапряжения проявляется при $\Delta U < 0,3$ В.

Показано, что понижение температуры окружающей среды приводит к уменьшению удельного коэффициента амплитудной чувствительности и, как следствие, к росту чувствительности Si-ФЭУ в режиме счета фотонов.

Работа выполнена при поддержке
Белорусского республиканского фонда
фундаментальных исследований
(договор № T20M-082).

ЛИТЕРАТУРА

1. Клемин С., Кузнецов Ю., Филатов Л., Бужан П., Долгошеин Б., Ильин А., Попова Е. // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2007. № 8. С. 80.
2. Ming Chen, Chenghao Li, Alan P. Morrison, Shijie Deng, Chuanxin Teng, Houquan Liu, Hongchang Deng, Xianming Xiong, Libo Yuan // Electronics. 2020. Vol. 9. No. 7. P. 1131. doi:10.3390/electronics9071131
3. van Dam H. A., Seifert S., Vinke R., Dendooven P., Löhner H., Beekman F. J., Schaart D. R. // Transactions on nuclear science. 2010. Vol. 57. No. 4. P. 2254.
4. Гулаков И. Р., Зеневич А. О. Фотоприемники квантовых систем. – Минск: УО ВГКС, 2012.
5. Асаёнок М. А., Зеневич А. О., Новиков Е. В., Кочергина О. В., Лагутик А. А. // Успехи прикладной физики. 2020. Т. 8. № 6. С. 464.

PACS: 85.60.-q

Investigation of the characteristics of matrix multi-element avalanche photodetectors operating in the photon counting mode

I. R. Gulakov, A. O. Zenevich, E. V. Novikov, O. V. Kochergina, and A. A. Lagutik

Belarusian State Academy of Communications
8/2 F. Skorina st., Minsk, 220114, Belarus
E-mail: o.kochergina@bsac.by

Received March 26, 2021

At present, matrix multi-element avalanche photodetectors operating in the photon counting mode are widely used for detecting optical radiation. However, the charac-

teristics of matrix multi-element avalanche photodetectors operating in this mode are currently insufficiently studied. Prototypes of Si-photomultiplier tubes (Si-PMTs) with a p^+p-n^+ structure produced by JSC Integral (Republic of Belarus), as well as serially produced silicon photomultipliers Ketek PM 3325 and ON Semi FC 30035 have been used as objects of research. This article presents the research results of characteristics in the photon counting mode of the specified photodetectors. The dependences of the specific amplitude sensitivity ratio on the wavelength of optical radiation, the temperature, the supply voltage of the matrix multi-element avalanche photodetector are determined.

Keywords: silicon photomultiplier tube, photon counting, amplitude sensitivity ratio, signal-to-noise ratio.

DOI: 10.51368/2307-4469-2021-9-3-216-223

REFERENCES

1. S. Clemin, Y. Kuznetsov, L. Filatov, P. Buzhan, B. Dolgoshein, A. Ilyin, and E. Popova, *Electronics: Science, Technology, Business*, No. 8, 80 (2007).
2. Ming Chen, Chenghao Li., Alan P. Morrison, Shijie Deng, Chuanxin Teng, Houquan Liu, Hongchang Deng, Xianming Xiong, and Libo Yuan. *Electronics* **9** (7), 1131 (2020), doi: 10.3390/electronics9071131
3. H. T. van Dam, S. Seifert, R. Vinke, P. Dendooven, H. Löhner, F. J. Beekman, and D. R. Schaart, *Transactions on nuclear science* **57** (4), 2254 (2010).
4. I. R. Gulakov and A. O. Zenevich, *PhotoReceivers of Quantum Systems* (Minsk, UO VGKS, 2012) [in Russian].
5. M. A. Asayonok, A. O. Zenevich, E. V. Novikov, O. V. Kocherhina, and A. A. Lahutsik, *Usp. Prikl. Fiz.* **8** (6), 464 (2020).